



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**NÍZKO RYCHLOSTNÍ ELEKTRICKÝ GENERÁTOR NA BÁZI
PERMANENTNÍCH MAGNETŮ**

A LOW SPEED PERMANENT MAGNET ELECTRICAL GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Jiří Dvořák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nízko rychlostní elektrický generátor na bázi permanentních magnetů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti se do popředí zájmu R/D týmů dostává zájem o vývoj moderních generátorů za využití permanentních magnetů. Topologie takových generátorů oproti klasickým dovoluje značně snížit hmotnost těchto generátorů a aplikovat je pro zařízení na přímou výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů (vítr, vlny, příliv). Koncept těchto generátorů je založen na redukci hmotnosti konstrukce, protože se odbourávají nežádoucí interakce magnetických sil, existující u konvenčních elektrických generátorů s kovovým jádrem.

Cíle bakalářské práce:

Analýza problému a literární rešerše.

Návrh řešení.

Vytvoření fyzikálních modelů základních elementů.

Seznam doporučené literatury:

MUELLER, Markus a Henk. POLINDER. Electrical drives for direct drive renewable energy systems. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013. Woodhead Publishing in energy, no. 24. ISBN 1845697839.

DONAL, Brendan. Energy storage systems for wave energy converters and Microgrids. A thesis submitted to the National University of Ireland, Cork for the degree of Doctor of Philosophy, March 2013.

DEEB, Ramia. Thermal calculations of permanent magnet motors in high current technology: Tepelné výpočty motorů s permanentními magnety v silnoproudé elektrotechnice : short version of Ph.D. Thesis. [V Brně: Vysoké učení technické], c2013. ISBN 978-80-214-4847-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh uložení lineárního elektrického generátoru buzeného permanentními magnety o zadaných vstupních hodnotách: frekvence pohybu 16 Hz a celkové výchylce 6 mm. Bylo požadováno, aby výstupní výkon generátoru byl minimálně 1 watt. Výpočet cívky je řešen v programu Wolfram Mathematica 11.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrický generátor s permanentními magnety, lineární elektrický generátor, permanentní magnety, neodymové magnety.

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the design of a linear electric generator driven by permanent magnets with input values: frequency move of 16 Hz and total deflection of 6 mm. The output power of the generator was required to be at least 1 watt. Coil calculation is solved in software the Wolfram Mathematica 11.

KEYWORDS

Electric generator with permanent magnets, linear electric generator, permanent magnets, neodymium magnets.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DVOŘÁK, J. *“Nízko rychlostní elektrický generátor na bázi permanentních magnetů”*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Zdeněk Hadaš.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zděnka Hadaše, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 15. května 2017

.....

Jiří Dvořák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D. za jeho podnětné připomínky. Dále chci poděkovat své rodině za jejich podporu v mém dosavadním studiu.

OBSAH

Úvod	9
1 Cíle práce a zadání.....	10
2 Rešerše.....	11
2.1 Piezoelektrický generátor.....	11
2.2 Elektromagnetický generátor	12
2.3 Formulace problému	12
3 Přeměna na elektrickou energii	13
3.1 Piezoelektrický jev	13
3.2 Magnetostrikční jev	14
3.3 Elektrostatický jev	14
3.4 Elektromagnetický jev	14
4 Permanentní magnet a vodič.....	15
4.1 Permanentní magnety	15
4.2 Vodič.....	16
5 Rotační – Lineární typ generátoru	17
5.1 Rotační generátor	17
5.2 Lineární generátor	18
6 Zjednodušení	19
7 Návrh řešení cívky.....	21
7.1 Varianta A.....	21
7.2 Varianta B	22
7.3 Odvození výpočtu	23
8 Výpočet varianty B.....	25
8.1 Výpočet rychlosti	25
8.2 Výpočet cívky	26
8.3 Výpočet výkonu cívky	31
9 Uložení generátoru	35
Závěr.....	38
Seznam použitých zkratk a symbolů	41
Seznam příloh.....	43

ÚVOD

Tradičnímu pojetí elektrických zdrojů energie a elektrické rozvodné sítě doposud neodzvonilo. Jedná se o uhelné nebo jaderné elektrárny, které jsou centralizovaným zdrojem elektrické energie a kabely, které vedou elektrickou energii z elektráren do měst, bytů až ke spotřebičům. V elektrárně se může elektrická energie měnit z fosilních paliv nebo lze využít alternativních zdrojů. Všeobecně známé alternativní zdroje elektrické energie jsou: větrné elektrárny, elektrárny využívající vodu a elektrárny využívající slunce. Tyto alternativní zdroje jsou schopny pracovat v ostrovním režimu v širším slova smyslu. Jedná se ale pouze o centralizovaný zdroj v menším měřítku, například fotovoltaické články na střeše domu. Nejlepším možným řešením by bylo, aby každý spotřebič měl svou vlastní malou elektrárnu.

V dnešní době technologie takové řešení neumožňuje. Lze využít baterie, ale ani ty nejsou ideálním řešením. Baterie, které máme v dnešní době k dispozici, mají limitovaný počet nabíjecích cyklů a je nutné je pravidelně nabíjet nebo vyměnit za nabité. Přestože není možné každému samostatnému zařízení dodat jeho vlastní elektrárnu, pro některé aplikace toto řešení již možné je. Tato alternativa se nazývá „energy harvesting“ nebo ji lze nalézt pod hesly „power harvesting“ nebo „energy scavenging“.

Toto řešení využívá jako zdroj energie vibrace nebo teplo, tedy odpadní nebo parazitní zdroje energie. Tyto generátory lze nalézt například u motorů vrtulníků, kde napájejí čidla. Ve větším měřítku lze nalézt tyto generátory například v Japonsku u turniketů při vstupu do metra, kde náslapná plocha v jejich okolí je vybavena generátory, které využívají energii lidské chůze. Vyvíjejí se i generátory, které by měl člověk připevněné na tělo a využívána by měla být energie při pohybu, tedy stahování svalů například pro nabití mobilního elektrického zařízení. Posledním příkladem je využití těchto generátorů u vlakové dopravy. Pokud vlak jede po kolejích a přejede přes železniční pražec, tak dojde k jejich rozvibrování. Na základě tohoto zdroje energie dochází k vytváření „high tech“ pražců, které tuto energii využívají. Způsobem, jak využít druhotného pohybu od jedoucího vlaku skrze koleje a pražce, se zabývá i tato práce.

1 CÍLE PRÁCE A ZADÁNÍ

Analýza problému a literární rešerše

Rešerše se zabývá v samostatné kapitole tím, jakým způsobem lze využít železniční pražce jako zdrojů energie. Nezabývá se, kde všude lze nalézt technologie pro energy harvesting, nebo jejich rozbořem [7]. Provedení konkrétního řešení a nastínění výhod a nevýhod z řady variant je u každého kroku a kapitolách práce, kde bylo potřeba učinit rozhodnutí o provedení, zdůvodněno.

Návrh řešení

Výstupem této bakalářské práce by měl být konstrukční návrh lineárního elektrického generátoru buzeného permanentními magnety. Dále nastínění způsobu, jak tuto cívku umístit do okolí pražce tak, aby byl model funkční a jak velký zástavný prostor pro cívku a permanentní magnety bude potřeba.

Vstupní hodnoty pro návrh generátoru jsou:

Frekvence pohybu	–	16 Hz
Celková výchylka	–	6 mm
Požadovaný minimální výkon	–	1 W

Vytvoření fyzikálních modelů základních elementů

Součástí této bakalářské práce je výpočet provedený v programu Wolfram Mathematica 11, kde lze upravit zadání dle vlastních hodnot, který simuluje základní fyzikální principy potřebné pro výpočet.

2 REŠERŠE

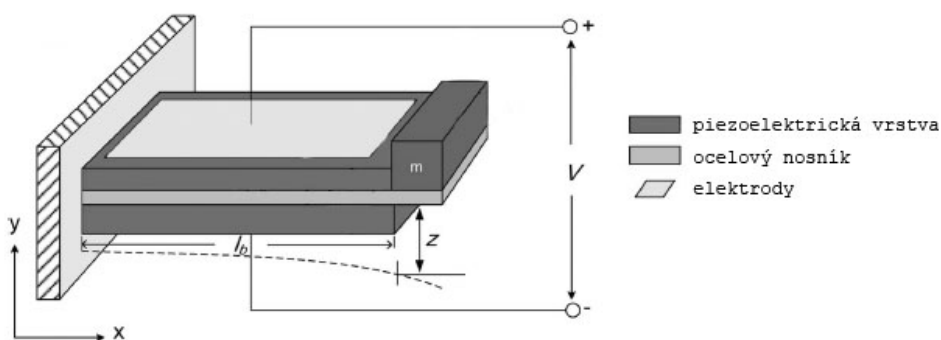
Aktuálně se vyvíjejí dvě varianty, které využívají pražce jako zdroj energie. První varianta je ta, že jsou osazeny fotovoltaickými články, tímto řešením se ovšem tato bakalářská práce nezabývá. Druhým řešením je využití vibrací, tedy energy harvesting. Pro převod z kinetické energie na energii elektrickou se využívá piezoelektrického nebo elektromagnetického generátoru buzeného vibracemi. Princip těchto jevů je popsán níže v kapitole č. 3. Využití této technologie je zejména díky návaznosti na další aplikace. Pražce, které jsou zdrojem energie, jsou nejčastěji vybaveny i senzory, které se tímto způsobem napájejí. [5][6].



Obr. 1 Vývoj pražců: dřevěný, betonový a pražec s energy harvesting technologií [8]

2.1 PIEZOELEKTRICKÝ GENERÁTOR

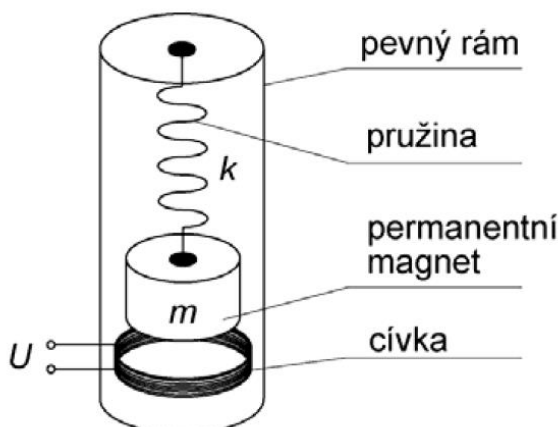
Piezoelektrický generátor se skládá z vetknutého nosníku a piezoelektrické vrstvy. Materiálem pro vetknutý nosník je nejčastěji ocel a piezoelektrická vrstva se skládá z piezokeramiky, která je pevně spojena s vetknutým nosníkem. Toto spojení tvoří rezonanční mechanismus s tuhostí k od nosníku a hmotností m od zátěže. Při rozvibrování mechanismu dochází k deformaci nosníku i piezokeramického materiálu a na základě piezoelektrického jevu se v této vrstvě začne generovat elektrické napětí U .



Obr. 2 Schéma piezoelektrického generátoru buzeného vibracemi [3]

2.2 ELEKTROMAGNETICKÝ GENERÁTOR

Jedná se o pohyb magnetického pole v okolí vodiče využívající Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Pokud se vodič nachází v proměnlivém magnetickém poli, začne se ve vodiči indukovat elektrické napětí. Uvažujeme-li, že magnetické pole pochází od permanentního magnetu, je lepší řešení pohybující se magnet a pevná cívka než naopak. Předěje se problému se spojením cívky a zbytku elektrického obvodu. Permanentní magnet, který tvoří hmotnost m , je spojen s pružinou o tuhosti k .

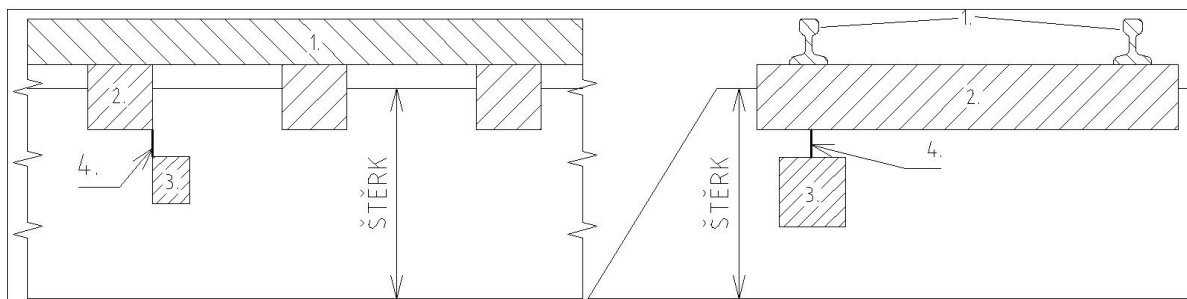


Obr. 3 Schéma elektromagnetického generátoru buzeného vibracemi [4]

2.3 FORMULACE PROBLÉMU

Při návrhu řešení generátoru je několik klíčových rozhodnutí, které je potřeba učinit:

- jaký jev se využije pro přeměnu na elektrickou energii (jaký piezoelektrický materiál nebo jaký permanentní magnet a jak bude tvarována cívka),
- o jaký generátor se bude jednat (zdali rotační nebo lineární typ),
- jakým způsobem bude tento problém řešen (zdali kinematická nebo dynamická úloha),
- stanovení zjednodušení a limitujících podmínek, aby tento problém byl řešitelný,
- dosažení požadovaného výstupu generátoru,
- jak bude generátor umístěn pod koleje,
- jak bude zajištěna jeho funkčnost.



Obr. 4 Umístění generátoru pod kolejemi: 1. kolejnice, 2. pražec, 3. generátor, 4. funkční spojení přenášející pohyb [19]

3 PŘEMĚNA NA ELEKTRICKOU ENERGII

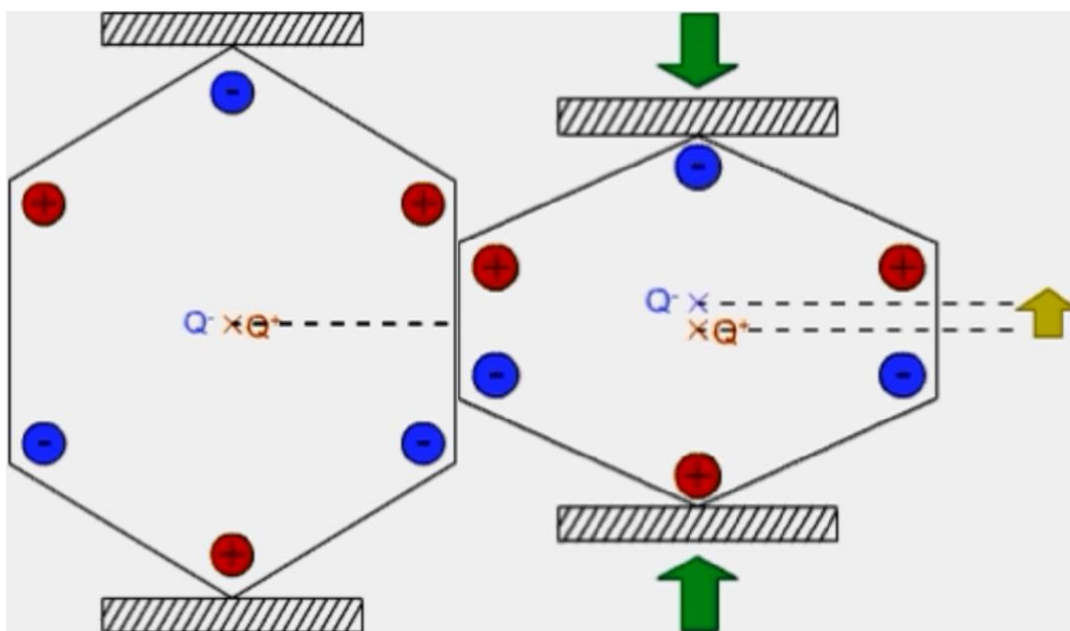
Při volbě jevu pro přeměnu na elektrickou energii bylo možné volit z několika jevů: piezoelektrický, magnetostrikční, elektromagnetický a elektrostatický. Je myšleno využívat mechanickou (kinetickou) energii při stlačení a odlehčení. Je tedy zcela zanedbána možnost využití tepelné energie.

Pro tuto aplikaci by nebylo efektivní využití magnetostrikčního jevu, proto se jím tato práce nijak nezabývá.

3.1 PIEZOELEKTRICKÝ JEV

Piezoelektrický jev byl poprvé popsán bratry Pierrem a Jacquesem Curieovými v roce 1880. Jev se projevuje tím, že pokud začneme deformovat krystal daného materiálu, tak se začne generovat elektrický náboj. Jev se vyskytuje především u krystalů, které nemají střed symetrie (například u monokrystalického křemene, sfaleritu nebo křišťálu) [11].

U piezoelektrického jevu se jedná o posuv iontů v krystalické mřížce. Kladné i záporné těžiště, které je na začátku deformace shodné, se po deformaci liší. Tím se vytvoří elektrický náboj (viz Obr. 5).



Obr. 5 Deformace krystalu [10]

Pokud bychom na 1 cm³ krystalu vyvinuli sílu 2 kN, jsme schopni naměřit až 12500 V. Limitem tohoto jevu je tedy velikost síly, kterou jsme schopni dodat, zvolený piezoelektrický materiál a tzv. Curiova teplota, tedy teplota, při které se začne narušovat krystalická mřížka. Jedná se o změnu, která probíhá skokově. Curiova teplota je pro každý materiál individuální.

Příkladem využití toho principu je piezo zapalovač.

3.2 MAGNETOSTRIKČNÍ JEV

Tento jev byl popsán Jamesem Prescottem Joulem v roce 1842. Tento jev se vyskytuje pouze ve feromagnetických materiálech, jako jsou železo, nikl, gadolinium, kobalt a další, případně jejich slitiny. Pokud je tento materiál umístěn v magnetickém poli, dojde k jeho deformaci. Nebo pokud tento materiál deformujeme, lze kolem něj pozorovat magnetické pole [12].

Tento jev nachází své uplatnění například u snímačů.

3.3 ELEKTROSTATICKÝ JEV

Jev byl popsán anglickým fyzikem Johnem Cantonem v roce 1753. Pokud máme na jednom tělese elektrický náboj a přiblížíme jej k tělesu jinému, můžeme pozorovat, že se původně na nenabitěm tělesu začne indukovat elektrický náboj. Tento nový indukovaný náboj má opačnou polaritu než náboj u prvního tělesa. Pokud je těleso vodivé, můžeme s nábojem dále pracovat – lze ho odvést. Pokud je dané těleso izolant, nijak ho neodvedeme. Jedná se o princip fungování kondenzátorů [1], [13].

Příkladem využití elektrostatického jevu je elektrický kondenzátor. U kondenzátorů se využívá vzduchové mezery mezi vodiči. Mezi nimi se uchovává elektrický náboj. Jde ovšem pouze o uchování, nikoliv generování.

3.4 ELEKTROMAGNETICKÝ JEV

Jedná se Faradayův zákon elektromagnetické indukce, který byl popsán Michaellem Faradayem v roce 1831. Pokud se bude uzavřený elektrický obvod nacházet v pohybujícím se magnetickém poli, nebo se bude obvod pohybovat v nepohybujícím se magnetickém poli, lze ve vodiči pozorovat indukované elektrické napětí. Třetí možností je využití nestacionárního magnetického pole. Magnetické pole lze vytvořit pomocí elektromagnetu nebo lze využít permanentních magnetů [2].

Velikost indukovaného napětí je závislé na vodiči, který je v magnetickém poli, síle magnetického pole a poloze vodiče vůči magnetickému poli – úhel mezi magnetickými siločárami a vodičem (směr procházejícího proudu). Pokud uvažujeme, že magnetické siločáry jdou ze severu na jih, tak lze využít pravidlo pravé ruky, abychom zjistili směr procházejícího proudu nebo síly [1][14].

Na principech elektromagnetického jevu funguje například elektromotor.

Pro další řešení bylo využito elektromagnetického jevu. Toto rozhodnutí bylo učiněno na základě informační podpory pro danou problematiku s tímto jevem, dále na poučení se z různých konstrukcí využívající tento druh přeměny z kinetické energie na energii elektrickou, případně nejméně finančně náročné fyzické realizaci výsledků této bakalářské práce.

4 PERMANENTNÍ MAGNET A VODIČ

Magnetické pole, které indukuje napětí, bude pocházet od permanentních magnetů. Bylo tedy důležité vhodně zvolit permanentní magnet.

U magnetů, kromě základních rozměrů samotného fyzického magnetu, rozlišujeme řadu fyzikálních veličin. Jedná se o magnetickou indukci, intenzitu magnetického pole, maximální energetický součin, magnetický tok a permeabilitu. V této bakalářské práci se pro výpočet využívá pouze magnetická indukce.

Vzhledem k problematice intenzity magnetického pole došlo ke zjednodušení. Budeme uvažovat, že magnetické pole od permanentního magnetu se bude chovat jako homogenní, bude se vyskytovat pouze v ploše magnetu a hodnota magnetické indukce bude 0,3 T.

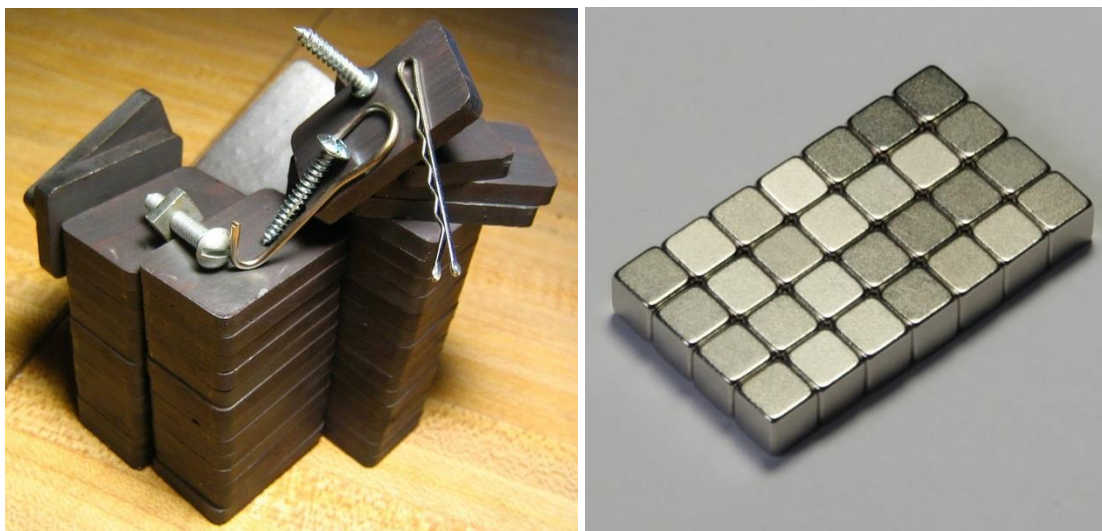
4.1 PERMANENTNÍ MAGNETY

4.1.1 FERITOVÝ MAGNET

Feritové magnety jsou tvořeny z keramických oxidů – feritů (viz Obr. 6). Tyto magnety jsou odolné velkému rozsahu teplot ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$) a také korozi, lze je tedy od neodymových magnetů, které jsou povlakovány, poměrně snadno odlišit. Na rozdíl od neodymových magnetů je jejich magnetická indukce nižší. Další nevýhodou je, že časem slábnou. Při stejných rozměrech je pro využití elektromagnetického jevu lepší využít magnetů neodymových.

4.1.2 NEODYMOVÉ MAGNETY

Tyto magnety jsou složeny z neodymu, železa a boru – NdFeB. Jedná se o nejsilnější známé permanentní magnety (viz Obr. 6). Jejich nevýhoda je ztráta magnetických vlastností v závislosti na teplotě. Od $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ již ztrácí své vlastnosti. Lze vytvořit magnety s vyšší odolností vůči teplotě, ale s rostoucí odolností vůči teplotě roste i jejich cena. Neodymové magnety snadno korodují, proto se niklují, pozinkovávají nebo se zalévají do pryskyřice nebo plastu.



Obr. 6 Vlevo feritový magnet, vpravo neodymový magnet [15][16]

4.2 VODIČ

Uvažujeme vodič prvního řádu, tedy že volné elektrony přenáší elektrický proud. Existuje celá řada materiálů, které lze využít jako vodič, například grafit, zlato, stříbro, hliník a měď. Toto jsou nejčastěji používané vodiče. Mohou být využity i další prvky, ty ale nejsou tak dobře vodivé. Lze určit několik kritérií pro jejich výběr: vodivost, cena, dostupnost a pracovní podmínky. Vzhledem k této bakalářské práci a na základě výše popsaných kritérií je nejlepší použít lakovaný měděný drát. Rezistivita mědi $\rho = 1,678 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ [1].

Všechny rozměry magnetů a měděného drátu, s kterými se v této bakalářské práci počítá, jsou reálné katalogové hodnoty zjištěny z internetových stránek českých výrobců. Jedná se o www.magsy.cz; www.neomag.cz; a www.ges.cz.

Zvolené rozměry permanentních magnetů pro výpočet byly zvoleny čistě náhodně. Průměr vodiče použitý při výpočtu byl určen na základě opakovaného provedení výpočtu a hledání ideální varianty v závislosti na rozměrech magnetů.

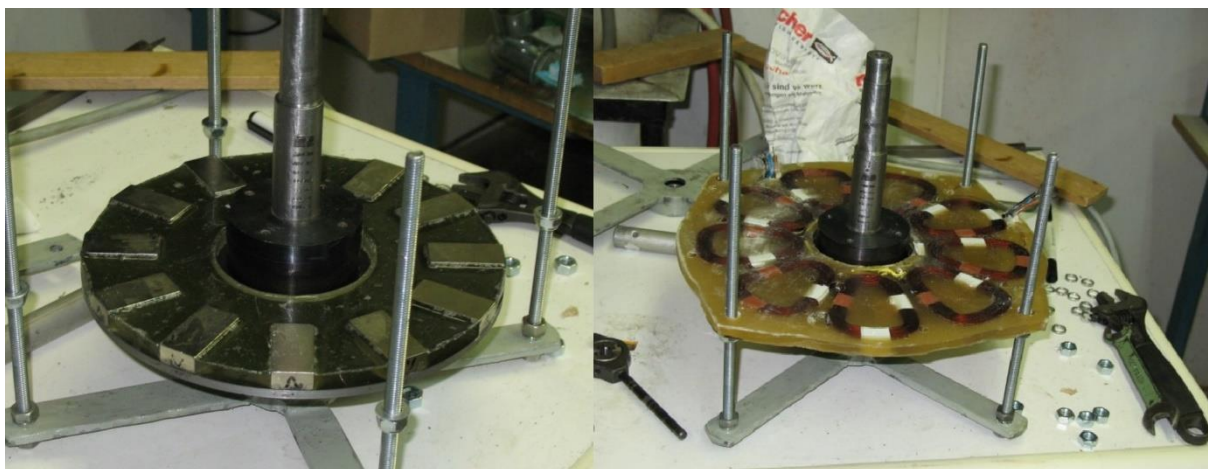
5 ROTAČNÍ – LINEÁRNÍ TYP GENERÁTORU

Při navrhování elektrického generátoru uplatňující princip elektromagnetického jevu s permanentními magnety můžeme uvažovat o konstrukci rotační nebo lineární. Nelze říci, že lineární řešení je lepší než rotační a naopak. Nejdůležitější předpoklad pro zvolenou konstrukci je, jaký pohyb chceme využít u generátoru.

5.1 ROTAČNÍ GENERÁTOR

Jedná se o opačný princip fungování elektromotoru bez permanentních magnetů. Lze ho zjednodušeně popsat takto: u elektromotoru se dodává střídavý proud do cívek, díky kterému vznikne statorové točivé magnetické pole, které časovou změnou indukuje ve vinutí rotoru napětí, které protlačí vinutím rotoru proud, neboť rotorového vinutí je spojeno nakrátko. Tento rotorový proud vytvoří točivé magnetické pole, které působí na magnetické pole statoru tak, že se rotor začne vzhledem ke statoru otáčet. U generátoru máme zajištěné magnetické pole od permanentních magnetů a je tedy pouze nutné ho dát do pohybu.

Konstrukce rotačního generátoru, který by byl schopen využít plný potenciál vstupní energie, by byla velmi problematická i přes využití permanentních magnetů. Na vstupu je přímočarý pohyb. Bylo by tedy nutné dosáhnout převodu z přímočarého pohybu na pohyb rotační. Dalším problémem je uložení rotoru. Lze předpokládat, že u užití této konstrukce by došlo k velkým ztrátám vlivem tření u převodu pohybu a uložení rotoru.



Obr. 7 Zleva rotor s permanentními magnety a stator [9]

Na základě těchto nedostatků u rotační konstrukce bylo výhodné přejít ke konstrukci lineární, tedy využívající přímočarý pohyb ze vstupu bez jakékoliv další přeměny.

Využití rotačního elektrického generátoru s permanentními magnety můžeme nalézt například u větrných elektráren (viz Obr. 9).

5.2 LINEÁRNÍ GENERÁTOR

Tento generátor využívá k indukování napětí přímočarý pohyb. Stejně jako u rotačního typu funguje na stejných principech elektromagnetické indukce a je tedy bezvýznamné, jestli se bude pohybovat magnetické pole a vodič zůstane v klidu či naopak.

V této bakalářské práci bude pohyb vykonávat permanentní magnet. Pokud by měla pohyb vykonávat cívka, vytvořil by se tím problém se zapojením.

Lineární elektrický generátor s permanentními magnety můžeme nalézt například u dalších aplikací energy harvesting, dále u komerčně dostupných samonabíjecích svítilen (viz Obr. 8).



Obr. 8 Lineární generátor použitý ve svítilně [17]

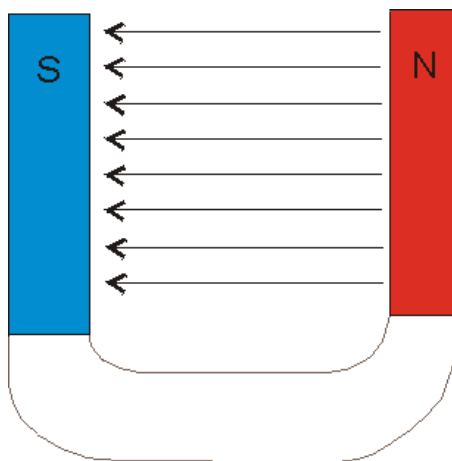
Tato bakalářská práce bude tedy postavena na principech lineárního elektrického generátoru.

6 ZJEDNODUŠENÍ

V této kapitole je výčet všech zjednodušení a výchozích parametrů, které byly v této bakalářské práci učiněny.

Konstantní pracovní teplota – uvažujeme konstantní pracovní teplotu 20 °C, tudíž se nepředpokládá tepelná roztažnost a možná deformace cívky a ostatních částí generátoru. Také se tím zanedbává rozdílný odpor vodiče v závislosti na teplotě.

Homogenní magnetické pole – předpokládáme, že magnetické pole mezi dvěma magnety je zcela homogenní bez ohledu na vzdálenost mezi nimi, proto je důležité si uvědomit, že od určitého momentu budou výsledky nereálné. Ohraničení magnetu je přesně kopírované magnetickým polem, tudíž magnetické pole je pouze v ploše kolmé na plochu magnetu ve směru magnetických siločar (viz Obr. 9). Magnetická indukce tohoto homogenního magnetického pole je uvažována $\text{mag} = 0,3 \text{ T}$.



Obr. 9 Homogenní magnetické pole [18]

Délka vodiče – do výpočtu délky vodiče byla zahrnuta pouze cívka bez započítání spojení generátoru s dalším zařízením. Délka vodiče byla počítána dle střednice vodiče. Nebyla zohledněna nepřesnost při přechodu mezi jednotlivými vrstvami, protože tato chyba je zcela zanedbatelná.

Spotřebič a odpor – v této práci není nijak řešeno napojení z generátoru na dílčí aplikace. Z důvodu absence zadání pro konkrétní spotřebiče budeme uvažovat impedanční přizpůsobení zátěže generátoru.

Pohyb jako funkce sinus – reálný pohyb, který nastává při přejezdu vlaku, není sinusový, ovšem bez provedení měření ho lze těžko odhadnout a modelovat. Na základě tohoto zjednodušení budou mít sinusový průběh i proud, napětí a výkon. Pokud je soustava v klidu a je uvedena do pohybu (stlačením), dochází k přechodnému stavu, kde narůstá rychlost i zrychlení, které se neřídí jinak obecným popisem tohoto pohybu. Proto se uvažuje nepřetržitý pohyb s tím, že rychlost má sinusový průběh a zrychlení cosinusový průběh.

Pohyb bodu – při výpočtu uvažujeme jeden konkrétní bod, s kterým je realizovaný celý výpočet.

Kinematická úloha – tato úloha by šla řešit jako dynamická úloha dle Lagrangeovy rovnice II. druhu. Pokud by tak byla řešena, byly by výsledky této bakalářské práce přesnější. Protože nebylo provedeno žádné konkrétní měření, nebyly zadány žádné jiné vstupní parametry a výsledky této práce jsou pouze teoretické a dle pokynů vedoucího, je tato úloha řešena kinematicky.

Přímý vodič v magnetickém poli – zanedbáváme možnost výrobní nepřesnosti cívky a nevhodné orientace permanentního magnetu. Vodič svírá se siločarami magnetického pole úhel 90° , počítáme tedy s maximální možnou účinností.

Vstupní parametry – lze předpokládat, že vhodné nadimenzování generátoru a všech dílčích parametrů je vysoce ovlivněno umístěním zařízení. Velkou roli zde hraje hmotnost a rychlost přejíždějících vlaků, jaké pražce budou pod koleji, na jakém podkladu budou tyto pražce umístěny, v jakém loži se bude generátor nacházet a v jakých klimatických podmínkách bude umístěn. Proto výpočet z této práce se vstupními parametry o výchylce 6 mm a frekvenci pohybu 16 Hz nemusí být aplikovatelný za všech okolností.

Ideálně tuhý materiál – nebyl proveden žádný výpočet, který by kontroloval pevnost materiálu či jeho životnost s ohledem na zatížení a vnější síly. Proto uvažujeme vše ideálně tuhé.

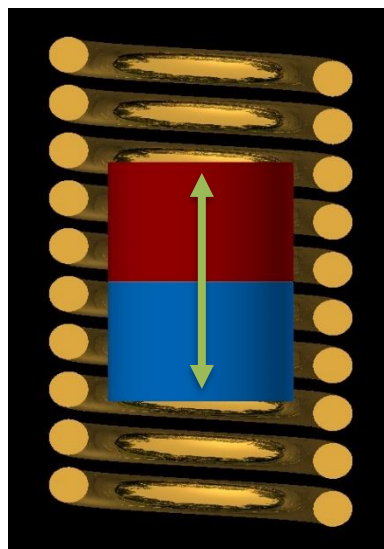
7 NÁVRH ŘEŠENÍ CÍVKY

Na základě zadání pro tuto bakalářskou práci jsou navrženy dvě alternativy pro řešení cívky. Obě řešení uvažují pevnou cívku a pohybující se permanentní magnet.

7.1 VARIANTA A

Permanentní magnet je uvnitř cívky (typ solenoid) a koná přímočarý pohyb v ose cívky (viz Obr. 10). Na základě zjednodušení v předešlé kapitole č. 6 byla tato varianta spočítána. Výsledky jsou ovšem pouze orientační. V tomto případě vzniká velká chyba tím, že se uvažuje přímý vodič v magnetickém poli. Pro dostatečně přesný výsledek by bylo nutné zohlednit zakřivení cívky a orientaci siločar magnetického pole. Vypočítané hodnoty by bylo obtížné uplatnit v praxi. Mezera mezi stěnou magnetu a vodičem byla uvažována o velikosti průměru vodiče. Tato varianta má svůj vlastní výpočet v příloze (viz P1.1), ale nebylo s ní dále pracováno.

Použité vzorce pro výpočet přímého vodiče v magnetickém pole jsou v další podkapitole č. 7.2.



Obr. 10 Schématické znázornění varianty A [19]

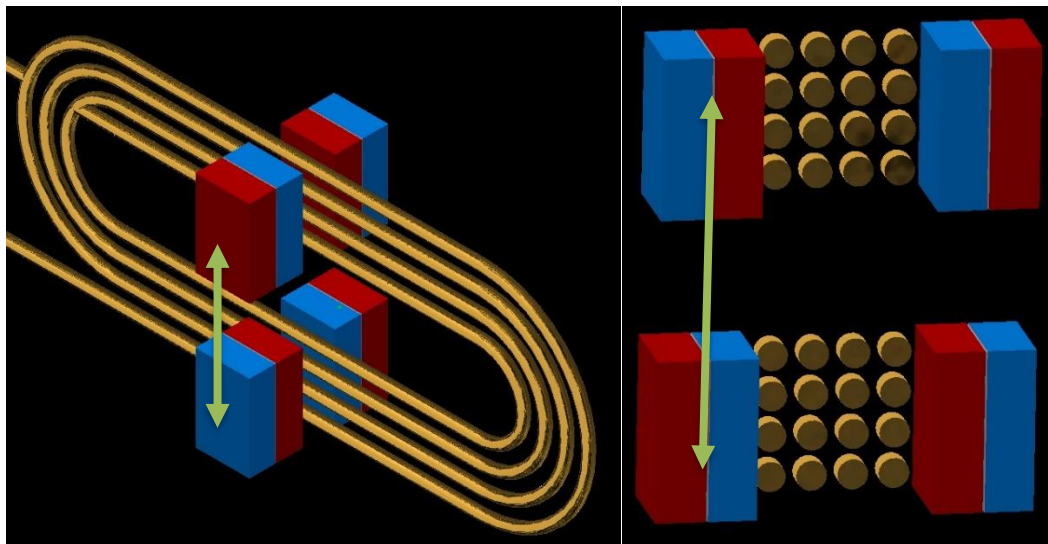
Zadání pro navržení cívky o výkonu minimálně 1 W, která bude mít tyto parametry.

Tab. 1 Vypočítané hodnoty varianty A

Parametr	Hodnota	Jednotka
Počet závitů	3 x 47	1
Průměr vodiče	1,18	mm
Průměr magnetu	30	mm
Výška magnetu	50	mm
Odpor vodiče	0,08	Ω
Procházející proud	2,57	A
Indukované napětí	0,72	V
Výkon	1,08	W

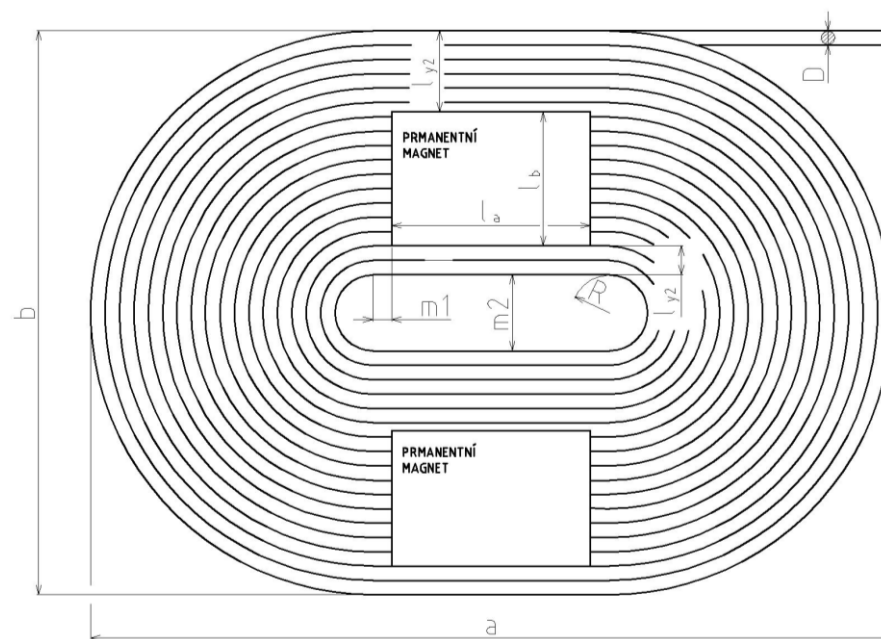
7.2 VARIANTA B

V této variantě se jedná o plošnou cívku. Permanentní magnet se nehýbe uvnitř cívky jako ve variantě A, ale kolmo na osu cívky (viz Obr. č. 11). Tento návrh cívky vychází z použité konstrukce u lineárního motoru. Užití permanentních magnetů v obou větvích (částích) docílíme maximální možné účinnosti.



Obr. 11 Schématické znázornění varianty B [19]

Dle schématu jsou použity dva páry stejných permanentních magnetů (viz Obr. 12). Z hlediska výpočtu se počítá pouze s jedním magnetem v každé větvi. V případě realizování této bakalářské práce by bylo nutné zohlednit siločáry magnetického pole. Přestože ve výpočtu se siločarami magnetického pole nijak neoperujeme, při návrhu velikosti schránky pro cívku ale uvažujeme maximální možnou efektivitu díky uzavřenému magnetickému poli. Toho bychom měli docílit takto vhodně orientovanými dvěma páry permanentních magnetů.



Obr. 12 Schéma lineárního generátoru [19]



7.2.1 KONSTRUKCE CÍVKY

Při realizování můžeme uvažovat samonosnou cívku. Cívka je zalitá tekutinou (například epoxidovou pryskyřicí), která po zaschnutí ztuhne a udrží tvar cívky. Dalším řešením je cívka navinutá na nevodivé jádro, které její tvar udrží. Určit vhodné řešení je bez praktické realizace a žádných zkušeností obtížné. Bylo zvoleno řešení samonosné cívky.

7.3 ODVOZENÍ VÝPOČTU

Výsledný vzorec pro výpočet výkonu se odvíjí od vzorce pro výpočet proudu, který je nutné odvodit. Všechny tyto základní rovnice jsou převzaté [1].

Výpočet výkonu:

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} = \frac{W}{t} \quad [\text{W}] \quad (1)$$

Kde: P [W] – výkon,

U [V] – napětí,

I [A] – proud,

R [Ω] – odpor,

W [J] – energie,

t [s] – čas.

Výpočet energie:

$$W = F \cdot s \quad [\text{J}] \quad (2)$$

Kde: W [J] – energie,

F [N] – síla,

s [m] – dráha.

Výpočet rychlosti:

$$v = \frac{s}{t} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

Kde: v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost,

s [m] – dráha,

t [s] – čas.



Výpočet síly:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{l} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

Kde: F [N] – síla,

B [T] – magnetická indukce,

l [m] – délka vodiče v magnetickém poli,

I [A] – proud.

Z těchto rovnic je realizovaný celý výpočet proudu. Následuje dosazení a úprava.

První věcí, kterou odvodíme, je výpočet proudu. Ostatní výpočty pro výkon a proud vycházejí ze základních tvarů. Výpočet odporu je popsán níže (viz rovnice č. 22). Výpočty pracující s cívkou a jejím vodičem jsou v kapitole 8.2.

$$R \cdot I^2 = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = \frac{B \cdot I \cdot l \cdot s}{t} = B \cdot I \cdot l \cdot v \quad (5)$$

Výsledný vzorec pro výpočet procházejícího proudu cívkou je:

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{l}}{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{v} \quad [\text{A}] \quad (6)$$

Kde: I [A] – proud,

B [T] – magnetická indukce,

l [m] – délka vodiče v magnetickém poli,

R [Ω] – odpor,

v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost.

8 VÝPOČET VARIANTY B

Celý výpočet je realizovaný v programu Wolfram Mathematica 11. Použité grafy jsou ze stejného programu a jsou importovány. Pro výběr tohoto softwaru nebyl žádný konkrétní důvod. Splňoval požadavky, které byly potřeba pro splnění zadání této práce. Tento výpočet je dále zpracován v dalších kapitolách této bakalářské práce. Protože řešíme pohyb hmotného bodu, lze říci, že při stlačení dojde k posuvu o $l_{y1} = 5$ mm. Při odlehčení a vrácení do původní polohy dojde k zakmitnutí o velikosti $l_{y2} = 1$ mm. Děj probíhá s frekvencí $f = 16$ Hz. Tím je ukončen cyklus a začíná nový.

8.1 VÝPOČET RYCHLOSTI

Výchozí funkce pro celkovou výchylku H myšleného bodu v závislosti na čase byla určena, aby vystihla požadavky v zadání (odlehčení a stlačení) (viz Obr. 13). Rovnice pohybu uvažuje harmonický pohyb, tedy neustálé stlačování a odlehčování a nebere v potaz mezery mezi jednotlivými koly při přejezdu nad daným místem.

Při výpočtu je nutné frekvenci z Hz převést na $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

Rovnice výchylky:

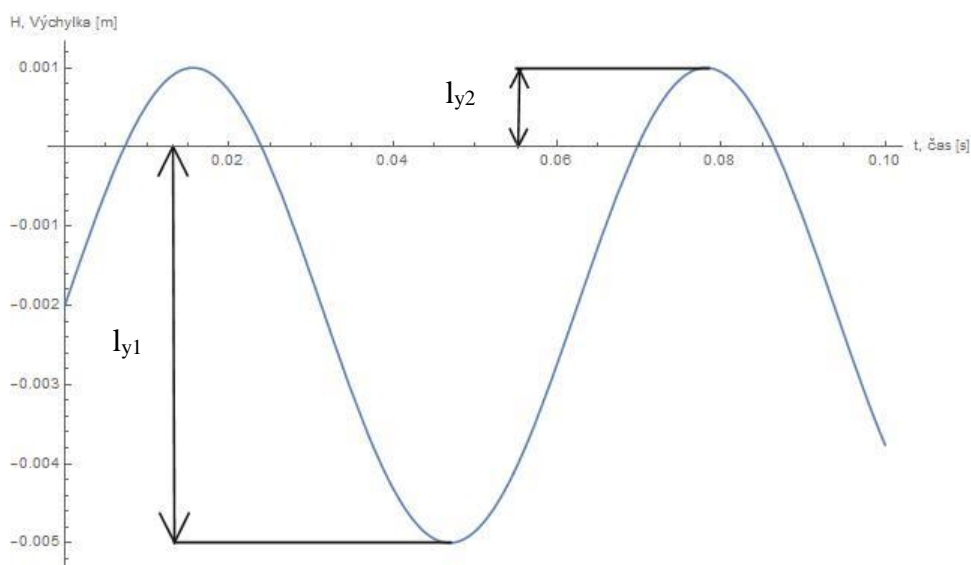
$$H(t) = \frac{l_{y1} + l_{y2}}{2} \cdot \sin[(t) \cdot f] - \left(\frac{l_{y1} + l_{y2}}{2} - 0.001\right) \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

$$H(t) = \frac{1+5}{2} \cdot \sin[(t) \cdot (2 \cdot \pi \cdot 16)] - \left(\frac{1+5}{2} - 1\right) \quad [\text{mm}]$$

Kde: $l_{y1} = 5$ mm – výchylka při stlačení,

$l_{y2} = 1$ mm – výchylka při odlehčení,

$f = 16$ Hz – frekvence pohybu.



Obr. 13 Výchylka v závislosti na čase [19]

Pokud tuto rovnici výchylky zderivujeme podle času t , dostaneme rovnici rychlosti v v závislosti na čase (viz Obr. 14).

Rovnice rychlost:

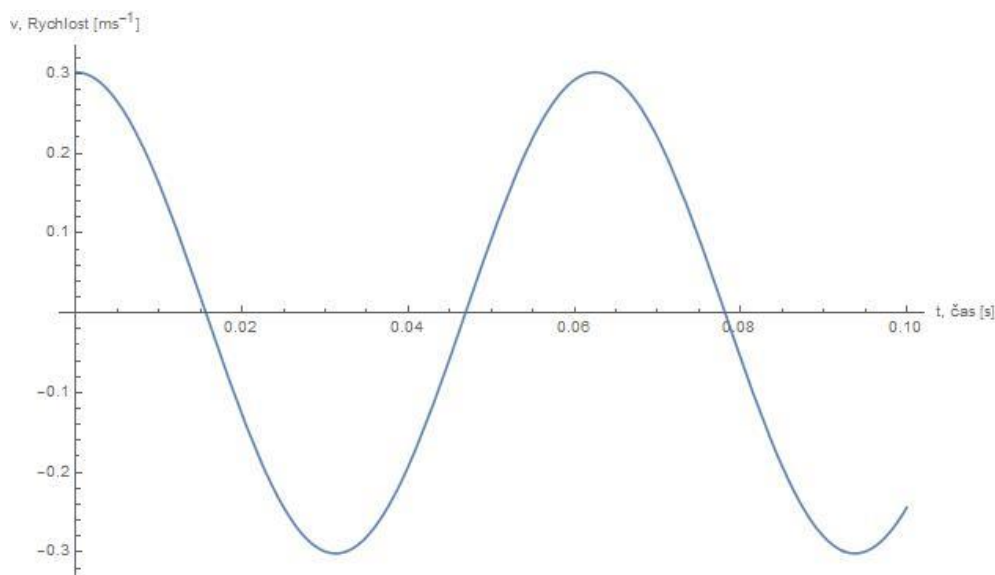
$$v(t) = f \cdot \frac{l_{y1} + l_{y2}}{2} \cdot \cos[(t) \cdot f] \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

$$v(t) = (2 \cdot \pi \cdot 16) \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}}{2} * \cos[(t) \cdot (2 \cdot \pi \cdot 16)] \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Kde: $l_{y1} = 5 \text{ mm}$ – výchylka při stlačení,

$l_{y2} = 1 \text{ mm}$ – výchylka při odlehčení,

$f = 16 \text{ Hz}$ – frekvence pohybu.



Obr. 14 Rychlost při stlačení a odlehčení [19]

8.2 VÝPOČET CÍVKY

Při navrhování cívky se postupovalo pomocí jednotlivých iterací výpočtu, dokud nebyly nalezeny vhodné parametry cívky. Protože intenzita magnetického pole, rychlost a dráha byly zadány, bylo možné upravovat pouze velikost magnetu, tedy magnetického pole, v kterém bude vodič, průměr vodiče a počet závitů. Při zjednodušení s homogenním magnetickým polem jsme schopni pomocí tohoto výpočtu dosáhnout ideálních parametrů cívky pro libovolný magnet. Je nutné si uvědomit smyslnost hodnot, které získáme. Následně budeme chtít s výstupem z cívky dále pracovat, například užitím diodového usměrňovače. Při průchodu diodou dojde ke ztrátě až 0,7 V, výkon cívky tedy poklesne. Je tedy nutné dostatečně zohlednit výstupní parametry cívky s ohledem na použité zařízení.

Výchozí rozměry: magnet – š x v x t – 35 x 35 x 15 mm,

vodič – 1,18 mm.

Tab. 2 Vstupní rozměry

Parametr	Permanentní magnet			Vodič
	Šířka	Výška	Tloušťka	Průměr
Symbol a jednotka	l_a [mm]	l_b [mm]	t_c [mm]	D [mm]
Rozměry	35	35	15	1,2

Plocha vodiče:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (9)$$

$$S = \frac{\pi \cdot 1,2^2}{4} = 1,13 \text{ mm}^2$$

$$S = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Kde: $D = 1,2 \text{ mm}$ – průměr vodiče,

$\pi = 3,14$ [1] – konstanta.

Počet závitů na výšce magnetu:

$$N_1 = \frac{l_b}{D} \quad [1] \quad (10)$$

$$N_1 = \frac{35}{1,2} = 29,167 [1]$$

$$N_1 = 30 [1]$$

Kde: $l_b = 35 \text{ mm}$ – výška magnetu,

$D = 1,2 \text{ mm}$ – průměr vodiče.

Počet závitů závislých na dráze:

$$N_2 = \frac{l_{y1} + l_{y2}}{D} \quad [1] \quad (11)$$

$$N_2 = \frac{1 + 5}{1,2} = 5 [1]$$

$$N_2 = 5 [1]$$

Kde: $l_{y1} = 5 \text{ mm}$ – výchylka při stlačení,

$l_{y2} = 1 \text{ mm}$ – výchylka při odlehčení,

$D = 1,2 \text{ mm}$ – průměr vodiče.

Počet závitů cívky v jedné vrstvě:

$$N_{12} = N_1 + N_2 \quad [1] \quad (12)$$

$$N_{12} = 30 + 5 = 35 [1]$$

$$N_{12} = 35 [1]$$

Kde: $N_1 = 30 [1]$ – počet závitů na výšku magnetu,

$N_2 = 5 [1]$ – počet závitů závislých na dráze.

Počet vrstev cívky N_v – tato hodnota byla zjištěna pomocí iterací.

N_v – počet vrstev cívky – 10 [1]

Celkový počet závitů cívky:

$$N_c = N_v \cdot N_{12} \quad [1] \quad (13)$$

$$N_c = 10 \cdot 35 = 350 [1]$$

$$N_c = 350 [1]$$

Kde: $N_v = 10 [1]$ – počet vrstev cívky,

$N_{12} = 35 [1]$ – počet závitů cívky v jedné vrstvě.

Celková délka zaoblení cívky:

$$za = \sum_{i=1}^{N_{12}} \pi \cdot D \cdot x_{N_{12}} \quad [mm] \quad (14)$$

$$za = \sum_{i=1}^{35} \pi \cdot 1,2 \text{ mm} \cdot 10^{-3} \cdot x_{35} = 2243 \text{ mm}$$

$$za = 2,24 \text{ m}$$

Kde: $N_{12} = 35 [1]$ – počet závitů cívky v jedné vrstvě,

$D = 1,2 \text{ mm}$ – průměr vodiče,

$\pi = 3,14 [1]$ – konstanta.

Aby bylo možné připevnit cívku do schránky, ve které se bude nacházet, je nutné ji lehce rozšířit (viz Obr. 12).

m_1	–	rozšíření cívky	–	5 mm
m_2	–	rozšíření cívky	–	10 mm

Délka vodiče cívky na jednu vrstvu:

$$l_{N_{12}} = 2 \cdot N_{12} \cdot (m_1 + m_2 + l_a) + za \quad [\text{mm}] \quad (15)$$

$$l_{N_{12}} = 2 \cdot 35 \cdot (5 + 10 + 35) + 2243 = 5643 \text{ mm}$$

$$l_{N_{12}} = 5,65 \text{ m}$$

Kde: $N_{12} = 35$ [1] – počet závitů cívky v jedné vrstvě,

$m_1 = 5$ mm – rozšíření cívky,

$m_2 = 5$ mm – rozšíření cívky,

$l_a = 5$ mm – šířka magnetu,

$za = 2243$ mm – počet závitů cívky v jedné vrstvě.

Celková délka vodiče cívky:

$$l_c = l_{N_{12}} \cdot N_v \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

$$l_c = 5643 \cdot 10 = 56\,430 \text{ mm}$$

$$l_c = 56,43 \text{ m}$$

Kde: $l_{N_{12}} = 5643$ mm – délka vodiče cívky v jedné vrstvě,

$N_v = 10$ [1] – počet vrstev cívky.

Šířka cívky:

$$a = 2 \cdot N_{12} \cdot D + l_a + 2 \cdot m_1 + m_2 \quad [\text{mm}] \quad (17)$$

$$a = 2 \cdot 35 \cdot 1,2 + 35 + 2 \cdot 5 + 10 = 136,6 \text{ mm}$$

$$a = 136,6 \text{ mm}$$

Kde: $N_{12} = 35$ [1] – počet závitů cívky v jedné vrstvě,

$D = 1,2$ mm – průměr vodiče,

$l_a = 5$ mm – šířka magnetu,

$m_1 = 5$ mm – rozšíření cívky,

$m_2 = 5$ mm – rozšíření cívky.

Výška cívky:

$$b = 2 \cdot N_{12} \cdot D + m_2 \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

$$b = 2 \cdot 35 \cdot 1,2 + 10 = 91,6 \text{ mm}$$

$$b = 91,6 \text{ mm}$$

Kde: $N_{12} = 35$ [1] – počet závitů cívky v jedné vrstvě,

$D = 1,2$ mm – průměr vodiče,

$m_2 = 5$ mm – rozšíření cívky.

Tloušťka cívky:

$$c_1 = 2 \cdot t_c + N_v \cdot D = 2 \cdot 15 + 10 \cdot 1,2 = 42 \text{ mm} \quad [\text{mm}] \quad (19)$$

$$c_1 = 2 \cdot 15 + 10 \cdot 1,2 = 42 \text{ mm}$$

$$c_1 = 42 \text{ mm}$$

Kde: $t_c = 15$ mm – tloušťka magnetu,

$N_v = 10$ [1] – počet vrstev cívky,

$D = 1,2$ mm – průměr vodiče.



Aby byl zajištěn plynulý chod mezi magnetem a cívkou, musíme mezi nimi uvažovat vůli k .

k – vůle – 1 mm

Rozšířená tloušťka cívky:

$$c = 2 \cdot k + c_1 \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

$$c = 2 \cdot 1 + 42 = 44 \text{ mm}$$

$$c = 44 \text{ mm}$$

Kde: $k = 1 \text{ mm}$ – vůle,

$c_1 = 42 \text{ mm}$ – tloušťka cívky.

8.3 VÝPOČET VÝKONU CÍVKY

ρ – rezistivita mědi – $1,678 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

mag – magnetická indukce – 0,3 T

Délka vodiče v magnetickém poli pro jeden pár magnetů:

$$l_m = l_a \cdot N_v \cdot N_l \quad [\text{mm}] \quad (21)$$

$$l_m = 35 \cdot 10 \cdot 30 = 10\,500 \text{ mm}$$

$$l_m = 10,5 \text{ m}$$

Kde: $l_a = 5 \text{ mm}$ – šířka magnetu,

$N_v = 10$ [1] – počet vrstev cívky,

$N_l = 30$ [1] – počet závitů na výšku magnetu.

Další výpočty už musejí být realizovány v základních jednotkách dle soustavy SI.

Odpor vodiče:

$$R = l_c \cdot \frac{\rho}{S} \quad [\Omega] \quad (22)$$

$$R = 56,43 \cdot \frac{1,678 \cdot 10^{-8}}{1,13 \cdot 10^{-6}} = 0,8373 \Omega$$

$$R = 0,8373 \Omega$$

Kde: $l_c = 56,43 \text{ m}$ – celková délka vodiče cívky,

$\rho = 1,678 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ – rezistivita mědi,

$S = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ – plocha průřezu vodiče.

Při výpočtu velikosti procházejícího proudu je vzorec již upraven pro co největší efektivitu. V čitateli počítáme s dvojnásobnou délkou vodiče l_m v magnetickém poli, protože uvažují dva páry magnetů.

Ve jmenovateli v obecném případě je R součet odporu vodiče a odporu připojeného zařízení. V tomto případě ale uvažujeme impedanční přizpůsobení zátěže generátoru, tedy zjednodušeně dvojnásobný odpor vodiče.

Velikost proudu:

$$I(t) = \frac{\text{mag} \cdot (l_m \cdot 2) \cdot v(t)}{2 \cdot R} \quad [\text{A}] \quad (23)$$

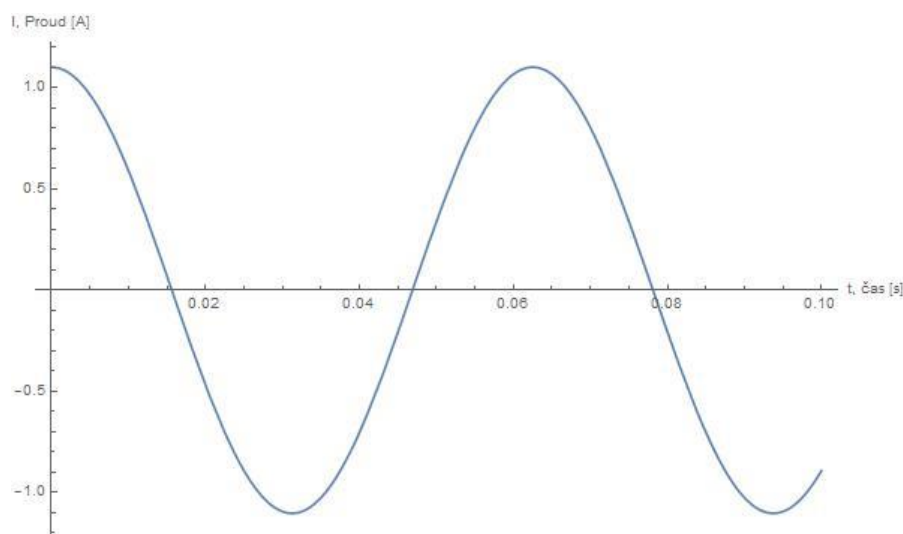
$$I(t) = \frac{0,3 \cdot (10,5 \cdot 2) \cdot v(t)}{2 \cdot 0,8373} \quad [\text{A}]$$

Kde: $\text{mag} = 0,3 \text{ T}$ – magnetická indukce,

$l_m = 10,5 \text{ m}$ – délka vodiče v magnetickém poli pro jeden pár magnetů,

$v(t) [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ – rychlost v závislosti na čase,

$R = 0,8373 \Omega$ – odpor.



Obr. 15 Velikost procházejícího proudu [19]

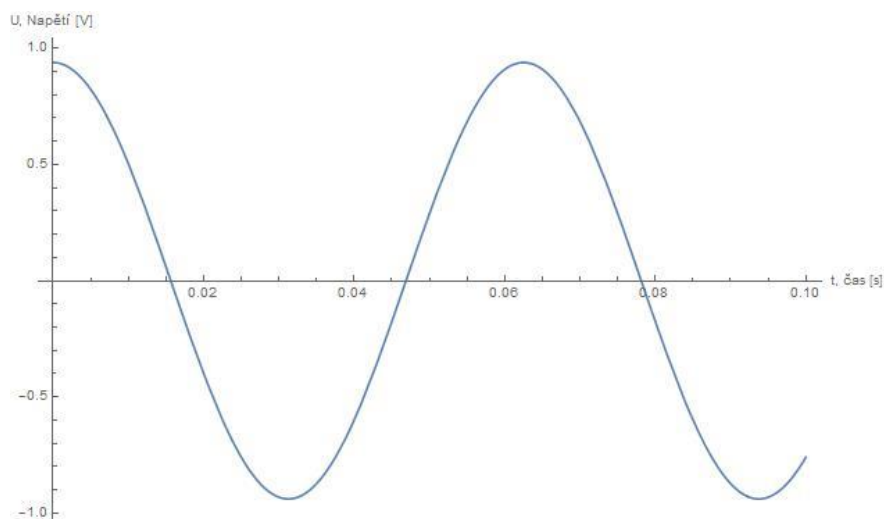
Velikost indukovaného napětí:

$$U(t) = I(t)R \quad [V] \quad (24)$$

$$U(t) = I(t) \cdot 0,8524 \, \Omega \quad [V]$$

Kde: $I(t)$ [A] – velikost proudu v závislosti na čase,

$R = 0,8373 \, \Omega$ – odpor.



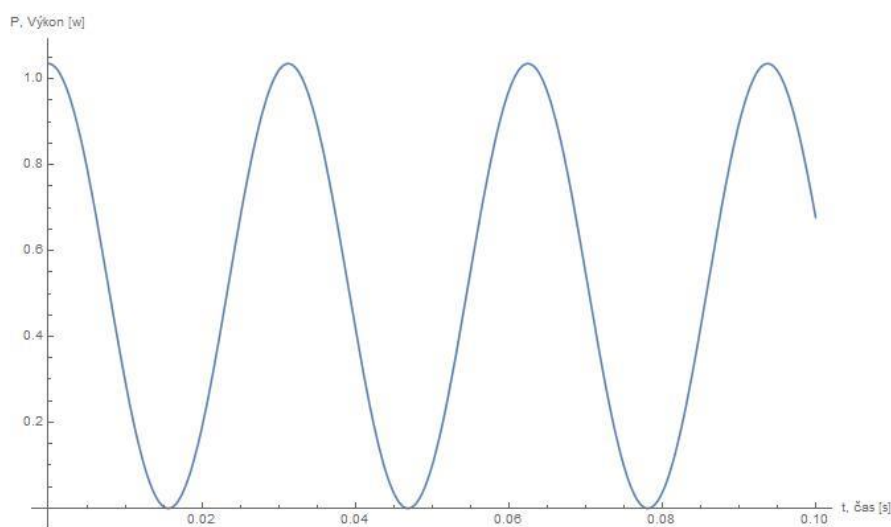
Obr. 16 Velikost indukovaného napětí [19]

Velikost výkonu:

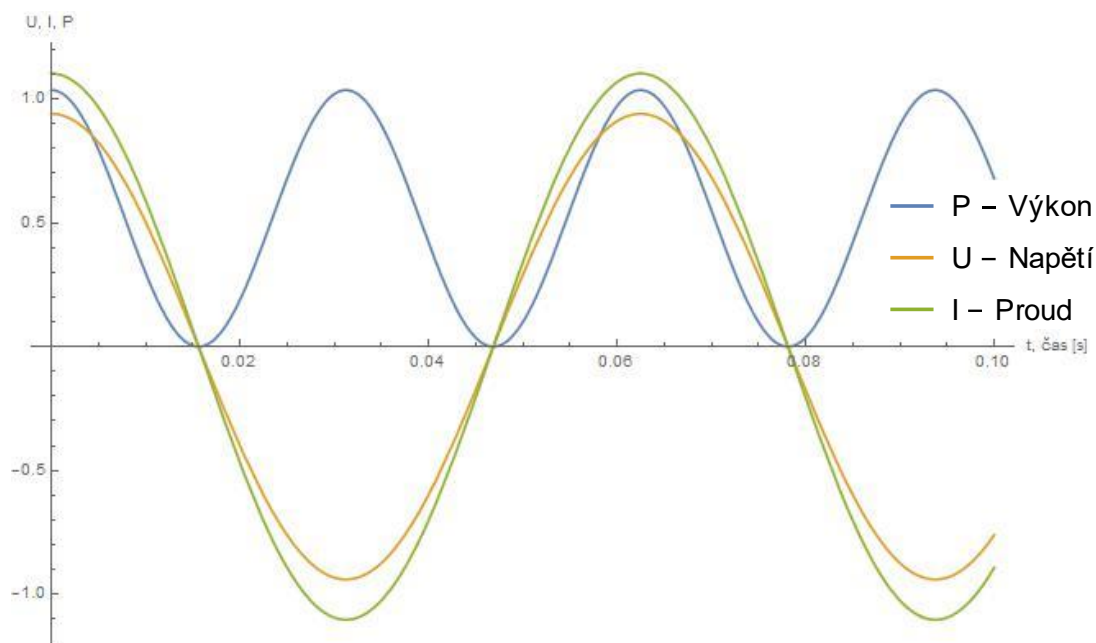
$$P(t) = I(t) \cdot U(t) \quad [W] \quad (25)$$

Kde: $I(t)$ [A] – velikost proudu v závislosti na čase,

$U(t)$ [V] – velikost napětí v závislosti na čase.



Obr. 17 Velikost výkonu v čase [19]



Obr. 18 Vyjádření napětí, proudu a výkonu v závislosti na čase [19]

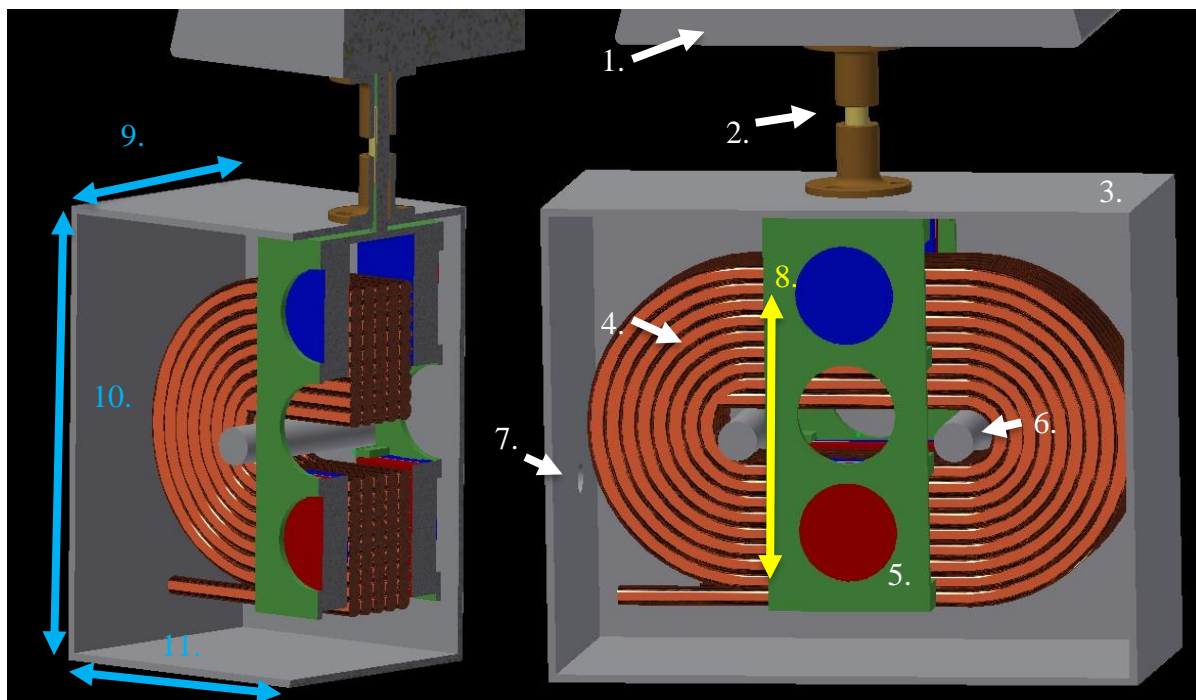
Výsledná tabulka s vypočítanými hodnotami z varianty B. Vypočítané hodnoty nejsou pro využití v praxi vhodné. Jedná se spíše o pochopení provedeného výpočtu. Následně byl proveden výpočet i s jinými hodnotami průměru vodiče pro stávající magnety, jehož výstupní hodnoty by měly být v praxi lépe využitelné.

Tab. 3 Výsledné hodnoty výpočtu

Parametr	Symbol	Hodnoty z var. A	Další hodnoty			
Celkový počet závitů	N_c [1]	350	2 210	2 255	2 244	2 244
Počet vrstev	N_v [1]	10	65	55	44	33
Průměr vodiče	D [mm]	1,2	1,2	1	0,8	0,6
Šířka magnetu	l_a [mm]	35	35	35	35	35
Výška magnetu	l_b [mm]	35	35	35	35	35
Tloušťka magnetu	t_c [mm]	15	15	15	15	15
Odpor vodiče	R [Ω]	0,837	5,442	7,996	12,386	21,978
Procházející proud	I [A]	1,103	1,103	0,762	0,492	0,277
Indukované napětí	U [V]	0,923	6,004	6,096	6,096	6,096
Výkon	P [W]	1,102	6,623	4,647	3	1,6908
Šířka cívky	a [mm]	136,6	136,6	137	136,6	136,6
Výška cívky	b [mm]	91,6	91,6	92	91,6	91,6
Tloušťka cívky	c [mm]	44	110	87	67,2	51,8

9 ULOŽENÍ GENERÁTORU

Na základě nespecifikování požadavků na dílčí aplikace umístěné v obalu pro generátor nebo zařízení, které má být napájeno, materiál, přesné stanovení polohy uložení, vnější zatížení, způsob výroby nebo potřeby a prostředky pro montáž či prostředí, ve kterém se bude nacházet, jsou všechny tyto a další parametry voleny. Je vysoká pravděpodobnost, že v případě realizace nebude tento návrh vhodný a bude potřeba jej upravit. Celý návrh uložení je zde formou obrázků bez zpracované výkresové dokumentace (viz Obr. 19, 20). V elektronické příloze jsou přiloženy CAD soubory s modely a sestavou (viz P.2).



Obr. 19 Schéma uložení lineárního generátoru: 1. pražec, 2. spojení s pražcem, 3. schránka, 4. cívka, 5. nosič s permanentními magnety, 6. čep, 7. díra pro přivedení vodiče, 8. pohyb lože s permanentními magnety, 9. tloušťka schránky – z, 10. výška schránky – y, 11. šířka schránky – x [19]

Permanentní magnety jsou v nosiči uloženy samosvorně pomocí vhodně tvarovaných držáků. Je možné, že by toto řešení nebylo vhodné a bylo by potřeba magnety lépe připevnit (například přilepením). Samotná kostra nosiče by měla být z nemagnetického materiálu. Každý magnetický materiál, který se nachází v magnetickém poli, nějakým způsobem ovlivní magnetické siločáry, a tím i magnetické pole a mohlo by tedy dojít i ke změně účinnosti vlivem nesprávné orientace vodiče v magnetickém poli. Nosič je připevněn k pražci a jedná se o pohybující se člen.

Tab. 4 Porovnání rozměrů cívky z varianty B a schránky

Rozměry	Cívky – [mm]	Schránka – [mm]
Šířka	136,6	151
Výška	91,6	150
Tloušťka	44	80

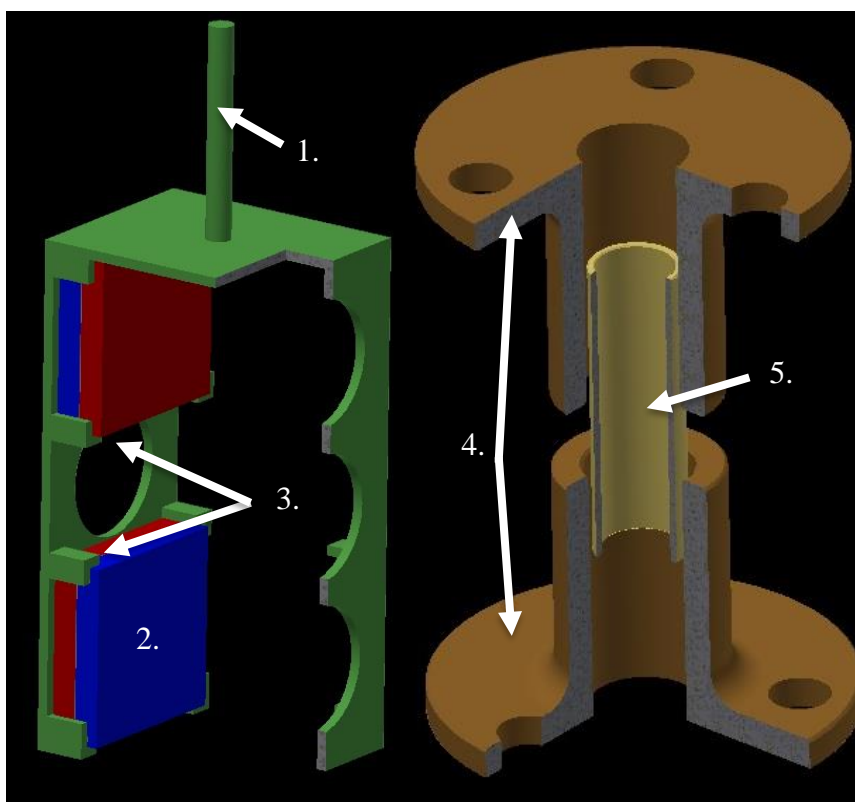
Pro výpočet rozměrů schránky musíme přistupovat individuálně. Pokud bychom ale chtěli použít stejný koncept jako pro variantu B, výsledné rozměry z dalších výpočtů jsou:

Tab. 5 Velikost schránky pro jiné vstupní hodnoty

Parametr	Symbol	Hodnota				
Šířka cívky	a [mm]	136,6	137	136,6	136,6	136,6
Výška cívky	b [mm]	91,6	92	91,6	91,6	91,6
Tloušťka cívky	c [mm]	110	87	67,2	51,8	110
Šířka schránky	x [mm]	151	152	151	151	151
Výška schránky	y [mm]	150	150,5	150	150	150
Tloušťka schránky	z [mm]	146	123	103,2	87,8	146

V případě realizace by jedním z klíčových kritérií bylo množství vyrobených kusů. Takováto schránka by šla snadno masově vyrábět pomocí vstřikování plastů. Bylo by ovšem nutné pozměnit její tvar a na namáhaných místech ji vyztužit pomocí žebrování atd. V každém spoji by bylo vhodné umístit těsnění. Na základě tohoto konceptu je reálně možné, aby po určitých úpravách tento lineární generátor fungoval i zatopený nebo zcela pod vodou, pokud by byly dokonale utěsněny všechny vodivé členy. Bylo by také nezbytně nutné tuto variantu více prostudovat. Lze očekávat, že by našla své uplatnění v řadě jiných, dosud nevyužitých aplikací.

Samotná cívky je držena pomocí dvou čepů (viz Obr. 19 bod č. 6.), které jsou upevněny ve stěnách schránky pro generátor. Čelní strana zde není zobrazena.



Obr. 20 Schéma v řezu, zleva: nosič permanentních magnetů - 1. čep nosiče, 2. permanentní magnety, 3. tvarované držáky, spojení s prázem - 4. příruba, 5. trubička [19]



Nosič permanentních magnetů by měl být pevně spojen s horní přírubou, která je spojena s pražcem. Dolní příruba je spojena se schránkou pro generátor. V nich je uložena trubička, která je nalisována na čep nosiče. Mezi trubičkou a přírubou je minimální vůle. Tímto by mělo být zabráněno vniknutí velkých nečistot a měl by být minimalizovaný odpor proti pohybu (viz Obr. 20).

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zjistit, jak velký zástavný prostor je potřeba pro generátor, který bude generovat alespoň 1 W. Dle požadavků zadání byl spočítán návrh generátoru, který s výstupem 1 W byl splněn. Základní rozměry uložení cívky a permanentních magnetů se dále odvíjely od tohoto výpočtu. Přesnost provedeného výpočtu primárně souvisí se zjednodušeními, které byly učiněny. Pokud by byl tento lineární generátor postaven na základě těchto výpočtů, lze předpokládat, že jeho výstupní naměřené hodnoty se budou lišit od hodnot vypočítaných. K jak velké chybě při výpočtu došlo, nejsem schopen odhadnout. Při navrhování uložení, na které nebyly kladené žádné požadavky či upřesnění, bylo počítáno pouze se základními rozměry cívky. Při návrhu byla v každém kroku zvažována alternativa a na základě jejich vyhodnocení bylo rozhodnuto o dalším postupu. V případě dodání dodatečných údajů lze předpokládat, že některý z kroků by mohl být jiný.

Dalším bodem bylo nastínit, jakým způsobem bude řešeno samotné uložení generátoru. V případě návrhu tohoto uložení generátoru pod koleje je nejisté, zdali by takový design bez dodatečných úprav pracoval zcela správně. Bez reálně sestaveného prototypu je toto pouze jedna z možných variant. V případě realizace by bylo bezpodmínečně nutné zjistit bližší informace o skutečném zatížení, kterému by bylo toto uložení vystaveno a v jakých podmínkách by bylo provozováno.

Výpočet, který byl realizován v program Wolfram Mathematica 11, je plně funkční. Pokud by došlo k rozšíření této práce, bylo by možné tento výpočet zpřesnit. V případě, že by se řešení změnilo z kinematické úlohy na dynamickou, velká část výpočtu by musela být nahrazena. Na základě aktuálních znalostí tohoto programu nejsem schopen určit, jestli by takové řešení bylo v tomto softwaru možné.

Tato práce je bez dalších dílčích vstupních parametrů teoretického charakteru a měla by sloužit pouze jako podklad pro další možná řešení rozšíření či předběžný odhad možného výsledku.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HALLIDAY, D, R RESNICK a J WALKER. Fyzika. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, c2013, 597-600, 706-713, 755-756, 768-770, 810-812. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [2] HAMMER, Miloš. *Elektrotechnika a elektronika: přednášky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, s. 61-69, 105-108. ISBN 80-214-3334-5.
- [3] KHALIGH, A., ZENG, P., ZHENG, C.: Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies – State of the Art. IEEE Transactions on industrial electronics. March 2010. Vol. 57, No. 3. s. 850-860. ISSN: 0278-0046
- [4] HADAŠ, Z.: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava. Brno, 2007. 98 s. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně na ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Školitelé disertační práce doc. Ing. Vladislav Singule, Csc., doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, Csc.
- [5] *GREENRAIL: High speed sustainable future* [online]. Milano: GREENRAIL, 2015 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.greenrail.it>
- [6] Trains' vibrations could provide power for monitoring tunnels. In: *Phys.org* [online]. Lisa Zyga, 2011 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2011-08-vibrations-power-tunnels.html>
- [7] POURGHODRAT, Abolfazl. *Energy Harvesting Systems Design for Railroad Safety*. Lincoln (Nebraska), 2011. University of Nebraska - Lincoln, Mechanical & Materials Engineering.
- [8] Traversine ecologiche in grado di produrre energia: si parte nel 2016. In: *Llifecycle* [online]. Milano: Mediagroup, 2015 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://corriereinnovazione.corriere.it/2015/10/11/traversine-ecologiche-grado-produrre-energia-si-parte-2016-3737e21c-703b-11e5-a08a-e76f18e62e8d.shtml>
- [9] Prvý alternátor. In: VAWT [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.vawt.om2cm.sk/?q=node/471>, upraveno se svolením autora
- [10] Piezoelektrický jev: Vznik piezoelektrického jevu. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev#/media/File:Piezoeffekt350px_clr.gif
- [11] Piezoelectricity. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>

- [12] Electromagnetism. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetism>
- [13] Magnetostriction. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetostriction>
- [14] Electrostatics. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatics>
- [15] Neodymový magnet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Neodymov%C3%BD_magnet#/media/File:Nd-magnet.jpg
- [16] Feritový magnet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Feritov%C3%BD_magnet#/media/File:Ceramic_magnets.jpg
- [17] Zápisy do sešitu - 6. pokračování: Stacionární magnetické pole. In: *Elektrina a magnetismus* [online]. 2004 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://elektross.gjn.cz/obrazky/magnet2.gif>
- [18] Mechanically powered flashlight: Shake type design. In: *Wikiwand* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/en/Mechanically_powered_flashlight
- [19] Tyto zdroje jsou prací autora a naleznete je v příloze v digitální verzi.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[mm]	Šířka cívky
b	[mm]	Výška cívky
B	[T]	Magnetická indukce
c	[mm]	Tloušťka cívky
c_1	[mm]	Rozšířená tloušťka cívky
D	[mm]	Průměr vodiče
f	[Hz]	Frekvence pohybu
H	[m]	Výchylka
I	[A]	Proud procházející obvodem
k	[mm]	Vůle mezi cívkou a magnetem
l	[m]	Délka vodiče v magnetickém poli
l_a	[mm]	Šířka magnetu
l_b	[mm]	Výška magnetu
l_c	[m]	Celková délka vodiče cívky
l_m	[mm]	Délka vodiče v magnetickém poli pro jeden magnet
l_{N12}	[m]	Délka vodiče cívky na jednu vrstvu
l_{y1}	[mm]	Výchylka při stlačení
l_{y2}	[mm]	Výchylka při odlehčení
m_1	[mm]	Rozšíření cívky
m_2	[mm]	Rozšíření cívky
mag	[T]	Magnetická indukce
N_1	[1]	Počet závitů na výšku magnetu
N_{12}	[1]	Počet závitů cívky v jedné vrstvě
N_2	[1]	Počet závitů závislých na dráze
N_c	[1]	Počet vrstev cívky
P	[W]	Výkon cívky
R	[Ω]	Odpor cívky
S	[m ²]	Plocha průřezu vodiče
t	[s]	Čas
t_c	[mm]	Tloušťka magnetu
U	[U]	Indukované napětí
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost pohybu



W	[J]	Energie
z_a	[m]	Celková délka zaoblení cívky
π	[1]	Konstanta
ρ	[$\Omega \cdot \text{m}$]	Rezistivita mědi

SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy jsou pouze na digitálním nosiči.

P1 – POUŽITÉ SKRIPTY A GRAFY WOLFRAM MATHEMATICA 11

P1.1 – varianta A cívka typu solenoid

P1.2 – varianta B plošná cívka

P2 – MODELY A SESTAVY INVENTOR 2017

P2.1 – sestava Generátoru

P2.1.1 – model Cívka

P2.1.2 – model Magnet

P2.1.3 – model Schránka

P2.1.4 – model Čep

P2.1.5 – model Pražec

P2.1.6 – model Příruba

P2.1.7 – model Trubička

P2.1.8 – model Nosič magnetů

P2.2 – sestava Spoj

P2.3 – sestava Nosič magnetů

P2.4 – sestava Návrh lineárního generátoru

P2.5 – sestava Řez cívky s magnetem

P2.6 – sestava Solenoid

P3 – VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE A SCHÉMATA AUTOCAD 2017

P3.1 – schéma uložení

P3.2 – schéma cívky